

# Medida del nivel de líquidos basado guías de onda metálicas huecas y fibras ópticas plásticas

## Measurement of liquid level based on hollow metallic waveguides and plastic optical fiber

M. LOMER, J.M. LAZARO, M.A. QUINTELA, F. MADRUGA, O. CONDE, J. MIRAPEIX, J.M. LOPEZ-HIGUERA

Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Avda. de los castros s/n

Persona de contacto: Mauro LOMER ([lomer@teisa.unican.es](mailto:lomer@teisa.unican.es)).

### RESUMEN:

Se presenta un sensor de medida continua de líquidos basadas en la utilización de dos tipos guías de ondas ópticas, fibras ópticas y guías de onda metálica hueca. La luz transmitida por la fibra óptica y acoplada en la guía de onda hueca iluminan la superficie del líquido, los haces reflejados por la superficie líquida son recolectados por otra fibras óptica. La intensidad óptica detectada es función de la distancia. La guía de onda metálica introduce una mejora en el rango de medida de un sensor de desplazamiento convencional, eliminando el efecto de la apertura numérica de la fibra óptica. El sistema propuesto utiliza componentes de bajo costo y de simple realización.

**Palabras clave:** Sensor de nivel, fibras ópticas plásticas, guías de onda metálica hueca, fibras ópticas multimodo.

### ABSTRACT:

A continuous liquid level fiber optic sensor based on a combination of one or more plastic optical fibers and a hollow metallic waveguide is here described. The purpose of using hollow metallic waveguides is to increase the sensing distance of conventional displacement sensors based on optical fibers and adapted for continuous level measurement. The distance to the liquid surface can be much greater than using free space if light sources such as low-cost light-emitting diodes are used. The light injected into the transmitting plastic optical fiber is coupled at the upper end of the hollow metallic waveguide illuminating the liquid surface.

**Key words:** level sensor, plastic optical fiber, hollow metallic waveguide, multimode optical fiber.

## 1.- Introducción

Los sensores de fibras ópticas tienen ventajas tales como inmunidad a las interferencias de radiaciones electromagnéticas y una alta sensibilidad. Estos sistemas son muy importantes para el sensado en lugares explosivos o en presencia de líquidos inflamables, parti-

cularmente si se trata de combustibles como la gasolina. La medida continua de nivel de líquido es altamente apreciado y numerosos esquemas y prototipos han sido propuestos en los últimos años.

Un sensor basado en tres fibras ópticas, una para iluminar el líquido y dos para recolectar

la luz reflejada ha sido presentada por Iwamoto et al., donde la intensidad detectada, en función de la distancia fibra y la superficie líquida, es proporcional al nivel del líquido [1]. Un sistema similar pero con un conjunto de lentes para enfocar la luz emitida y detectada en las fibras ópticas ha sido propuesto para la medida continua de líquidos [2]. Una solución basada en las medidas de las pérdidas de propagación producida por las reflexiones totales internas de una fibra óptica sumergida en líquido ha sido publicado recientemente [3]. La influencia del índice de refracción que rodea una fibra con redes de Bragg de periodo largo ha sido propuesto para la medida del nivel de líquidos [4]. Todos estos métodos necesitan arreglos ópticos sofisticados y componentes ópticos adicionales, así como un tratamiento de señal específico para deducir el nivel del líquido. El uso combinado de fibras ópticas y guías ópticas metálicas huecas (HMW: hollow metallic waveguide) fue propuesto por Branzalov et al., para la medida de desplazamiento [5], demostrando que la guía de onda metálica ubicada en la extremidad de salida de la fibras aumentaba el rango de medida. En este caso utilizó cobre como material de la guía metálica y logró medir una decena de milímetros.

Las guías de onda de tipo HMW presentan una atractiva alternativa a las fibras de núcleo sólido en la transmisión de luz en el infrarrojo [6]. Sus principales características son: capacidad de transmitir en un amplio rango de longitudes de onda que van del UV, visible y el IR medio, ventaja inherente de disponer un núcleo de aire lo que le permite transportar haces láseres de alta potencia, estructura relativamente simple y de bajo coste. En un principio, las guías HMW fueron realizadas para aplicaciones médicas e industriales en la transmisión del láser CO<sub>2</sub>, también han sido utilizadas para transmitir luz incoherente de gran ancho espectral para aplicaciones en espectroscopia y radiometría [7-8].

En este documento, se presenta la medida continua de nivel de líquido basado en la utilización combinada de dos tipos de guías de onda óptica: fibras ópticas plásticas (POF: polymer optical fiber) y guías de onda

HMW. El objetivo de utilizar las guías HMW es de aumentar el rango de medidas del sensor de desplazamiento convencional basado en fibras ópticas y que en nuestro caso ha sido adoptado y mejorado para la medida continua de nivel de líquidos.

## 2.- Diseño del sensor

### 2.1.- Fibras ópticas multimodo y guías de onda HMW

En fibras ópticas multimodo de salto de índice cuando el radio del núcleo es bastante grande con relación a la longitud de onda de trabajo, las propiedades de propagación de la luz se pueden deducir utilizando los argumentos de la óptica geométrica y se pueden describir de forma resumida. La luz se propaga a lo largo de la fibra mediante reflexiones totales internas. Utilizando la teoría paraxial, el confinamiento de la luz en la fibra es dada por la condición:

$$\theta \geq \theta_c = \text{sen}^{-1}(n_2/n_1) \quad (1)$$

donde  $\theta$  es el ángulo que hace el rayo con el eje de la fibra,  $\theta_c$  es el ángulo crítico, y  $n_2$ ,  $n_1$  son los índices de refracción del núcleo y la cubierta de la fibra respectivamente.

En comunicaciones ópticas y en aplicaciones de sensado es muy útil conocer la capacidad de emisión y recepción de una fibra óptica. Estos son: a) dimensiones físicas del núcleo, y b) ángulo máximo de aceptación. El ángulo máximo de aceptación,  $\Theta$ , es limitada por el ángulo de incidencia crítico en la interface entre el núcleo y la cubierta de la fibra. El ángulo crítico puede ser asociado a los parámetros de la fibra óptica a través de la ley de Snell-Descartes:  $n_0 \cdot \sin \Theta = n_1 \cdot \sin \theta_c$ , donde  $n_0$  es el índice de refracción del aire y a continuación se determina la apertura numérica (NA), calculada por,

$$NA = [n_1^2 - n_2^2]^{1/2} \quad (2)$$

La NA es un parámetro a tener en cuenta cuando la luz propagada por la fibra es acoplada en la guía de onda HMW.

La guía de onda HMW se basan en reflexiones especulares dentro de tubos metálicos. El parámetro fundamental para el guiado de la luz en un sistema de transmisión es el coeficiente de transmitancia del sistema. En una guía de onda HMW la atenuación del sistema está determinada por las propiedades reflectoras de superficie interna de la guía y la colimación de la luz al pasar a través de la abertura de entrada del tubo. Una ilustración de una guía de onda HMW de sección circular se muestra en la fig. 1. Para los rayos meridionales, la atenuación a través de una guía HMW de longitud  $L$  y diámetro  $d$  puede expresarse por la siguiente aproximación [9],

$$A = \gamma/\gamma_0 \approx R^{(L/d) \cdot \tan \theta} \quad (3)$$

donde  $R$  es el coeficiente de reflectancia especular en la superficie interior del tubo. Se puede demostrar que si la apertura de entrada de una guía de onda HMW es iluminada por un haz de sección uniforme, la aproximación para la atenuación total puede ser expresada por [6]:

$$A_t = \gamma/\gamma_0 \approx R^{0.85(L/d) \gamma_{\max}} \quad (4)$$

Un cálculo aproximado para una guía de onda HMW, de sección circular y con una relación de aspecto  $L/d=50$ , considerando un haz incidente de entrada con un ángulo máximo de  $\gamma_{\max}=0.52\text{rad}$  ( $30^\circ$ ) y un coeficiente de reflectancia de  $R=0.9$ , proporciona una atenuación total o transmitancia de  $A_t=0.097$ . Esto implica que el 90,3% de la potencia de entrada es absorbida por las reflexiones en la superficie metálica. Este inconveniente puede ser evitado parcialmente ya sea aumentando el coeficiente de reflectividad o disminuyendo la relación de aspecto y el ángulo máximo de incidencia.

En las figuras 2 y 3 se muestran las curvas reflectancia entre dos medios, air-agua y aire-aluminio respectivamente. Si se conside-

ra una fibra óptica emisora ubicada en el centro del eje de entrada de la guía de onda HMW (tubo de aluminio) y con una apertura numérica de 0,5, llenado parcialmente de agua en su interior, los rayos incidentes sobre la superficie del agua estarán comprendidos entre  $\pm 30^\circ$ . En este caso el porcentaje de luz reflejada es del orden de 2% cualquiera para ángulos de incidencia comprendidos entre 0 y  $30^\circ$ . Los rayos reflejados por la superficie de aluminio y que se propagan por reflexiones totales tienen ángulos incidentes sobre la pared metálica comprendidos entre  $60$  y  $90^\circ$ , por lo que la reflectividad es superior del 70%. A pesar que la luz reflejada por la superficie del agua es pequeña, una porción de éstas pueden ser recolectadas por la fibra receptora ubicada junto a la fibra emisora.

La intensidad detectada por el fotodiodo ubicado en el extremo de salida de la fibra receptora es proporcional a la distancia fibrilíquido. Los rayos de luz que atraviesa el líquido y que alcanzan el fondo del tanque pueden reingresar dentro de la HMW y acoplarse en la fibra receptora. Este efecto podría alterar las medidas del nivel. Para evitar esta posibilidad, se han desviado los rayos que llegan al fondo del tanque en otras direcciones colocando una superficie reflectora con un ángulo de  $45^\circ$  con relación al eje de la guía.

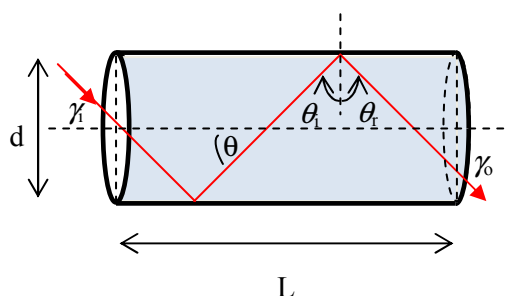


Fig. 1: Rayos propagados a través de la guía de onda de tipo HMW.



Fig. 2: Coeficiente de reflectividad en la interface aire-agua en función del ángulo de incidencia.

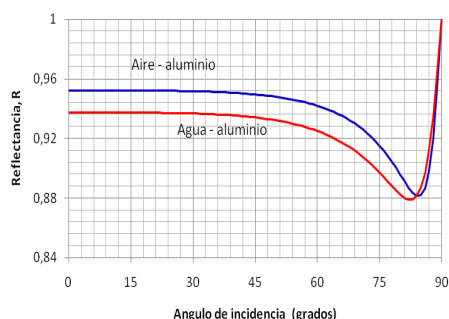


Fig. 3: Coeficiente de reflectividad en la interface agua-aluminio en función del ángulo de incidencia [13].

## 2.2.- Configuración del sensor

La configuración del sensor de medida continua de líquido se muestra en la fig. 4. En la fig. 5 se muestra el principio de funcionamiento de la HMW. El sistema de medida comporta dos porciones de fibras ópticas plásticas, una es emisora y otra receptora, cada uno de estos extremos se encuentran conectadas a la fuente de luz y el detector respectivamente. Los otros dos extremos de las fibras se encuentran en paralelo y juntas, ubicadas en el centro de la entrada de la guía de onda HMW. La guía de onda HMW se encuentra dispuesta verticalmente en el tanque. Con la finalidad que el líquido pueda desplazarse dentro de la guía y registre en mismo nivel que al exterior, una pequeña apertura en la parte superior de la HMW ha sido realizada.

El principio de funcionamiento del sensor se basa en medir los cambios de la intensidad óptica la distancia entre fibra óptica y la superficie del líquido a partir de los cambios en la intensidad de la luz reflejada experimentados por el desplazamiento ascendente o descendente del líquido en la guía de onda HMW.

El material de la fibra óptica de plástico es el Poly-methyl-methacrylate (PMMA). El diámetro del núcleo de las fibras utilizadas son de 0,49 mm. La apertura numérica es de 0,5, y la longitud de fibra óptica es de 2 m. El material de la guía de onda HMW es el aluminio de sección circular.

Como la fibra óptica emisora es una fuente de gran cantidad de modos, algunos de éstos son reflejados en la superficie interna de la de la guía de onda HMW y sufren cambios de dirección de propagación. Estos son modos de orden superior y hacen un ángulo importante con el eje de la guía. Cuando estos se reflejan en la superficie del líquido, pueden retornar hacia el plano de salida de la fibra. El sistema de recolección puede tener una o varias fibras ópticas. En nuestro caso hemos utilizado un sistema de dos fibras ópticas.

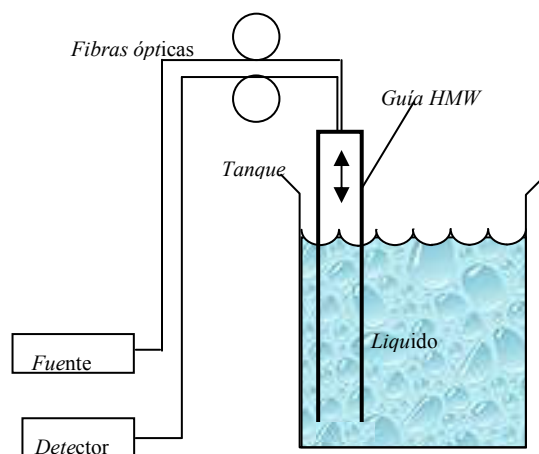


Fig. 4: Montaje experimental de medida continua de líquido en un tanque.

### 3.- Resultados experimentales

Con el montaje experimental mostrado en la fig. 2, compuestos de dos fibras POFs, se han realizado las medidas experimentales del nivel de líquido. La iluminación de la superficie líquida se realiza con una fibra ubicada en la parte superior de la guía HMW. Otra fibra óptica, ubicada en paralelo a la fibra emisora, recolecta los haces reflejados por la superficie líquida. La curva experimental de este sistema, intensidad en función de la distancia, tiene dos regiones, una primera región corta de incremento ascendente y una segunda región descendente y más extensa. En la figura 6 se muestra la curva de medida experimental donde se considera únicamente la segunda región del rango de medida. La primera región tiene un máximo de desplazamiento de 4 cm, mientras que la segunda región supera los 20 cm.

Cuando la fibra óptica emisora se asocia a la guía de onda HMW, el rango de medida del desplazamiento aumenta considerablemente debido a que la luz se concentra en el tubo metálico, dejando apertura numérica de la fibra sin efecto. Se ha utilizado un diodo LED como fuente de luz de longitud de onda de  $\lambda = 660\text{nm}$  y un diodo PIN como detector. Para evitar las perturbaciones de la luz ambiente se ha modulado y demodulado la luz a 1 KHz en la fuente emisora y el receptor respectivamente.

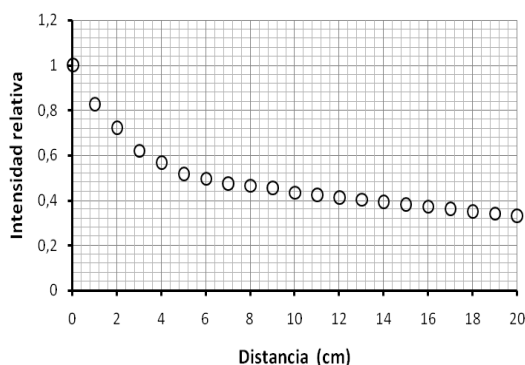


Fig. 6: Intensidad óptica relativa en función de la distancia a través de la guía HMW cuando el líquido es agua.

En general, la tendencia de la curva (Fig. 6) muestra un comportamiento similar a un sensor de desplazamiento con variaciones que presentan dos regiones descendentes lineales. Las medidas en el sentido inverso tienen la misma respuesta, porque el emisor y la recepción de las fibras no están en contacto con el líquido. Aunque las variaciones de la segunda pendiente son débiles, esta dificultad puede superarse con un adecuado diseño de la unidad optoelectrónica.

#### 3.1.- Configuración como sensor de nivel de líquido

Como los resultados experimentales obtenidos sugieren que el sistema de medida puede ser implementado como un sensor modulado en intensidad, este tiene que tener en cuenta algunos inconvenientes que pueden alterar las medidas de intensidad. Esto es, variaciones de intensidad que pueden ser ocasionadas por los propios cables de fibras y no de las variaciones del nivel de líquido o por variaciones de intensidad de la fuente LED por efecto de temperatura. Para superar estos inconvenientes, es necesario implementar un sistema de medida referenciada. Esto es utilizar una única fuente de luz, acoplada a dos fibras ópticas, una para iluminar la superficie del líquido y otra conectada directamente a un detector, D1. La fibra receptora es conectada al detector D2. Luego con un circuito electrónico puede realizar el cociente de las medidas como sumas y diferencias, dando como resultado únicamente correspondiente al nivel del líquido, tal como es mostrado en la figura 7.

Con la finalidad de eliminar los efectos de la corrosión metálica en la guía, una guía dieléctrica huecos exteriores con un recubrimiento metálico podría ser utilizado, al igual que se emplean en numerosas guías de huecos de este tipo [11-12]. En nuestros experimentos hemos utilizado fuentes LED inorgánicas, pero en la actualidad existen en el mercado fuentes de luz de bajo costo a base de OLED o diodos láseres, lo que podría ser utilizado con el propósito de aumentar el rango de medida.

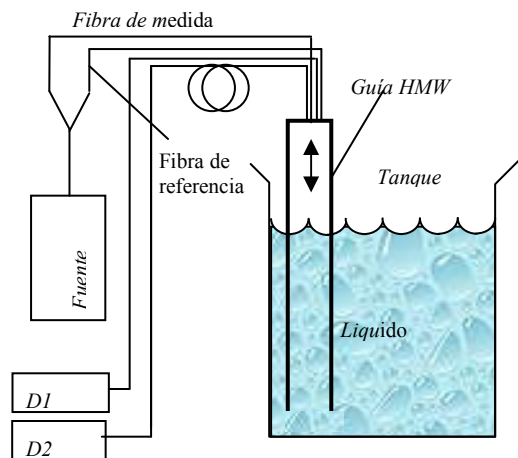


Fig. 7: Sensor del nivel de líquido modulado en intensidad.

#### 4.- Conclusión

Se ha demostrado que la asociación de una guía de onda metálica hueca a las fibras ópticas se pueden utilizar para la medida del nivel de líquidos. Los resultados experimentales obtenidos sugieren que el sensor puede ser utilizado en la medida de tanques de combustible en los automóviles, ya que tienen alturas típicas de alrededor de 10 cm.

En general, el sistema propuesto es de bajo costo, y simple de implementar.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología por su apoyo al presente trabajo mediante el proyecto TEC2007-67987-C02.

#### Referencias

- [1] K. IWAMOTO, and I. KAMATA, "Liquid-level sensor with optical fiber", *Appl. Opt.*, 31, 51-54 (1992).
- [2] C. VAZQUEZ, A.B. GONZALO, S. VARGAS and J. MONTALVO "Multi-sensor system using plastic optical fibers for

intrinsically safe level measurements", *Sensors Actuators A* 116 22-32 (2004)

- [3] F. PEREZ-ONCON, M. RUBINO, J.M. ABRIL, P. CASANOVA and J.A. MARTINEZ, "Fiber-optic liquid-level continuous gauge *Sensors Actuators A* 125 124-32 (2006).
- [4] S. KHALIV, S.W. JAMES and R. TATAM, "Fiber-optic liquid-level sensor using a long-period grating", *Opt. Lett.* 26 1224-6 (2001).
- [5] P.P. BRANZALOV, L.M. IVANOV, and L.I. PAVLOV, "Fiberoptic displacement sensor with a short hollow metal optical waveguide", *Rev. Sci. Instrum.* 70, 2166-2168, (1999).
- [6] J.A. HARRINTONG, *Select Papers on Infrared Fiber Optics, Milestone Series, Vol. MS-9*, SPIE, Bellingham, WA, 1990.
- [7] S.J. SAGESE, J.A. HARRINTONG, and G.H. SIGEL, "Attenuation of incoherent infrared radiation in hollow sapphire and silica waveguides", *Opt. Lett.* 16, 27-29, 1991.
- [8] M. SAITO, Y. MATSUURA, M. KAWAMURA, and M. MIYAGI, "Bending losses of incoherent light in circular hollow waveguides", *J. Opt. Soc. Am. A* 7, 2063-2068, 1990.
- [9] E.V. LOEWNSTEIN and D.C. NEWELL, "Ray traces through metal light-pipe elements", *Journal of the Optical Society of America*, 59, 407-414 (1969).
- [10] L. WARD, *The optical constant of bulk materials and films*, Inst. Phys. Publishing, 2nd Ed., Philadelphia, 1994.
- [11] M. MIYAGI and S. KAWAKAMI, "Design theory of dielectric-coated circular metallic waveguides for infrared transmission", *J. Lightwave Technol.*, LT-2, 116-126 (1984).
- [12] R.K. NUBLING, J.A. HARRINTONG, "Launching condition and mode coupling in hollow glass waveguide", *Opt. Eng.* 37(9), 2454-2458 (1998).
- [13] E. SHILES, T. SASAKI, M. INOKUTI, and D.Y. SMITH, "Self-consistency and sum-rule test in the Kramers-Kronig analysis of optical data: Application to aluminum", *Phys. Rev. Sect. B*, 22, 1612, (1980).